УДК [illegible]

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОПОРНОГО НАПРАВЛЕНИЯ ВОСТОК-ЗАПАД С ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ МАССОЙ ДЛЯ ГРАВИТАЦИОННО-ИНЕРЦИАЛЬНОГО КОМПАСА

В.С. Дмитриев, Ю.Г. Гладышев

Томский политехнический университет
E-mail: dtps@leg.tpu.ru

Рассмотрено построение устройств инструментального ориентирования основанных на действии силы Кориолиса на осциллирующую вдоль вертикали места массу. Показана возможность технической реализации чувствительных элементов гравитационно-инерциального компаса на основе механизма ориентирования живых организмов.

Ориентирование человека, подвижных и неподвижных объектов в наземных и подземных условиях, на водной поверхности и в подводной среде остаётся жизненной необходимостью индустриального общества. Возникают новые, ранее не встречавшиеся ситуации (зоны мощных магнитных и электромагнитных полей, очаги природных и техногенных катастроф, длительное нахождение подвижных объектов в океанских глубинах и т.д.), в которых существующие средства инструментального ориентирования: магнитные, индукционные, гироскопические и радиокомпасы не могут в полной мере обеспечить получение достоверной информации об опорных направлениях пространства [1]. Создание автономных навигационных устройств и их чувствительных элементов, способных надежно работать в этих ситуациях, становится неотложной потребностью.

Биологические системы ориентирования превосходят большинство технических систем по точности конечных результатов, по миниатюрности и надежности. Это всё чаще заставляет разработчиков высокоточных технических систем навигации обращать внимание на проблему изучения механизмов пространственного ориентирования мигрирующих птиц.

В результате исследований, выполненных Г.А. Швецовым [2], сформировалось понятие биологического гравитационно-инерциального компаса. Под ним понимается совокупность чувствительных элементов, способных улавливать переносное ускорение, возникающее вследствие вертикальных возвратно поступательных перемещений центра масс биологического объекта, суточного вращения Земли и, с помощью центральной нервной системы, выявлять с высокой точностью направление Восток-Запад. Такое навигационное устройство способно надежно функционировать в различных погодных условиях при воздействии магнитных и электромагнитных помех, в окруже-

Таблица. *Типы исследованных чувствительных элементов*

Наименование чувствительного элемента	Кинематическая схема	Принцип действия чувствительного элемента	Патенты РФ
Механические чувствительные элементы			
Маятник с упругим элементом и неподвижной точкой подвеса		Инерционное тело на упругом подвесе совершает колебания вдоль вертикали места, отклоняясь на угол от точки подвеса в направлении Восток-Запад под действием силы Кориолиса.	№ 2174217
Со свободно падающим инерционным телом		Инерционное тело в свободном падении под действием силы Кориолиса отклоняется к Востоку от начальной точки падения.	№ 2217698
Жидкостные чувствительные элементы			
Поплавковый с полупогруженным инерционным телом		Инерционное тело, полупогруженное в жидкость, всплывает и погружается при изменении давления над жидкостью, совершая колебания в направлении Восток-Запад под действием силы Кориолиса.	№ 2183820
Баллистический с полупогруженным инерционным телом		Инерционное тело, полупогруженное в жидкость и удерживаемое вдоль вертикали места силами поверхностного натяжения жидкости, отклоняется на угол в направлении Восток-Запад за счет накопленной ранее (во время движения жидкости по трубке при изменении давления над жидкостью) энергии.	№ 2234062

нии ферромагнитных материалов, в радионепрозрачных средах.

До середины 90-х гг. прошлого века практические разработки таких чувствительных элементов на основе биологических систем ориентирования отсутствовали.

Творческой группой, в которую входили авторы, был разработан ряд чувствительных элементов механического и жидкостного типов (см. таблицу), защищенных патентами РФ [3–6], и проведено исследование их динамических и точностных характеристик.

В рассматриваемом чувствительном элементе опорного направления Восток-Запад действующей физической величиной является кориолисово ускорение. Оно возникает как объективная реальность при движении тела в околоземном пространстве и характеризует изменение вектора относительной скорости $\upsilon_{отн}$ поступательного движения тела массой m в переносном вращательном движении Земли $\Omega_З$. Возникающее ускорение вызывает кориолисову силу $F_К$, которая всегда направлена в противоположную ускорению сторону. Способ ориентирования заключается в определении величины и направления Кориолисовой силы (или её проявлений), действующей на движущееся относительно Земли инерционное тело.

Работы по созданию технического аналога биологического гравитационно-инерциального компаса начались с исследования схемы чувствительного элемента с неподвижной точкой упругого подвеса. Такой тип чувствительного элемента является развитием устройства, предложенного Г.А. Швецовым [2] для демонстрации открытого им способа ориентирования. Схема действия сил в чувствительном элементе подобного типа приведена на рис. 1.

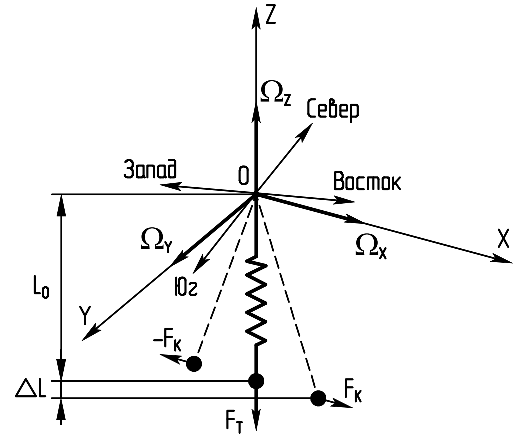


Рис. 1. *Схема действия сил в чувствительном элементе с неподвижной точкой упругого подвеса*

В общем виде система уравнений, описывающих движение инерционного тела, имеет вид:

$$\left.\begin{aligned} &\ddot{x}+2\Omega_y\dot{z}-2\Omega_z\dot{y}+\frac{k}{m}\left(1-\frac{L_0}{L_0+\Delta L}\right)x=\frac{F_{Kx}}{m}+F_x\\ &\ddot{y}-2\Omega_x\dot{z}+2\Omega_z\dot{x}+\frac{k}{m}\left(1-\frac{L_0}{L_0+\Delta L}\right)y=\frac{F_{Ky}}{m}+F_y\\ &\ddot{z}+2\Omega_x\ddot{y}-2\Omega_y\dot{y}+\frac{k}{m}\left(1-\frac{L_0}{L_0+\Delta L}\right)z=g+\frac{F_{Kz}}{m}+F_z \end{aligned}\right\}, \quad (1)$$

где: F_{Kx}, F_{Ky}, F_{Kz} – проекции силы Кориолиса на соответствующие оси; Ω_x, Ω_y, Ω_z – проекции вектора вращения системы координат на соответствующие оси; F_x, F_y, F_z – проекции внешней силы на соответствующие оси; k – жесткость упругого элемента; m – масса инерционного тела; g – ускорение свободного падения; L_0, ΔL – начальная длина и относительное удлинение упругого подвеса; x, y, z – координаты.

Аналитическое исследование динамики на основе системы уравнений (1) показало, что в устройстве ориентирования необходимо обеспечить параметрические резонансные колебания. В этом случае удается создать чувствительный элемент, позволяющий надежно и с требуемой точностью определить линию первого вертикала. В то же время математическое моделирование выявило и недостатки чувствительного элемента данного типа, в частности, нарастающую во времени погрешность определения направления [7].

Для устранения указанных недостатков было проведено исследование чувствительного элемента на основе свободнопадающего инерционного тела. Преимуществом устройства ориентирования такого типа является возможность минимизировать погрешность выявления опорного направления Восток-Запад, поскольку на инерционное тело при его свободном падении не оказывают воздействие элементы подвеса. Схема действия сил на свободнопадающее инерционное тело показана на рис. 2.

Дифференциальное уравнение движения свободно падающего вдоль вертикали места инерционного тела в проекциях на оси X,Y,Z имеет вид:

$$\left.\begin{aligned} &-m\frac{d\upsilon_z}{dt}=-mg+F_{cz}\\ &m\frac{d\upsilon_x}{dt}=-\sum_{i=1}^{n}\vec{F}_{Ki}-F_{cx}\\ &m\frac{d\upsilon_y}{dt}=-\sum_{i=1}^{n}\vec{F}_{Ki}-F_{cy} \end{aligned}\right\}, \quad (2)$$

где: F_{cx}, F_{cy}, F_{cz} – силы аэродинамического сопротивления свободному падению инерционного тела по соответствующим осям координат; υ_x, υ_y, υ_z – проекции линейной скорости инерционного тела; F_{Ki} – вектор силы Кориолиса в определенный момент времени.

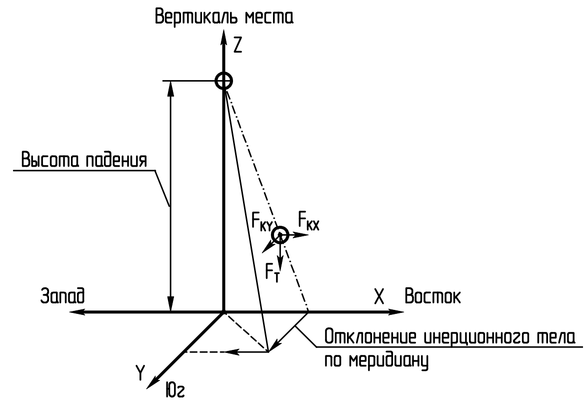


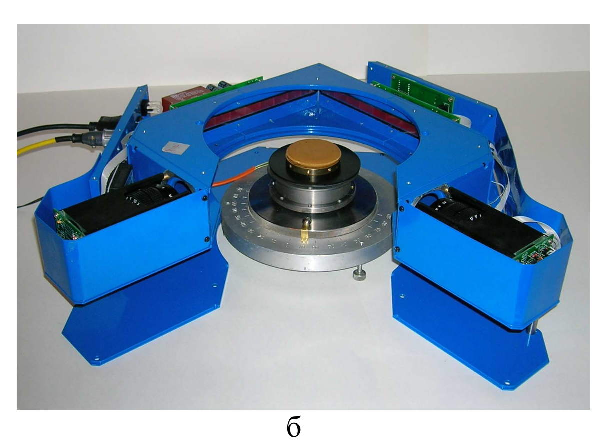
Рис. 2. Схема действия сил на свободнопадающее тело

Исследование динамики, проведенное на основе системы уравнений (2), определение условий и области отрыва инерционного тела от вибрирующей площадки, оптимизация динамических характеристик показали возможность создания устройства ориентирования и достижения приемлемых точностных параметров при выявлении линии первого вертикала. На основе этих исследований проведено макетирование чувствительного элемента, рис. 3. Реальные характеристики, полученные при испытании макета, совпали с теоретическими с точностью до 20 %.

Разработаны и реализованы два оптических способа съёма информации о векторе движения



а



б

Рис. 3. Узлы чувствительного элемента, построенного на основе свободнопадающего инерционного тела. Блоки: а) управления и индикации; б) инерционного тела

инерционного тела под действием силы Кориолиса: двухканальный и матричный. Они позволяют измерять микроперемещения инерционного тела в режиме реального времени в горизонтальной плоскости в диапазоне углов 2π, не оказывая силового воздействия на его динамику.

Исследование аэродинамики, геометрических размеров и формы падающего инерционного тела выявило, что лучшего результата, как бы это ни казалось на первый взгляд не логичным, можно достичь при организации падения инерционного тела в сопротивляющейся среде. Поэтому в процессе создания работоспособной конструкции чувствительных элементов были разработаны чувствительные элемента жидкостного тип и исследована их динамика. Силы, действующие на инерционное тело, находящееся в жидкости, показаны на рис. 4.

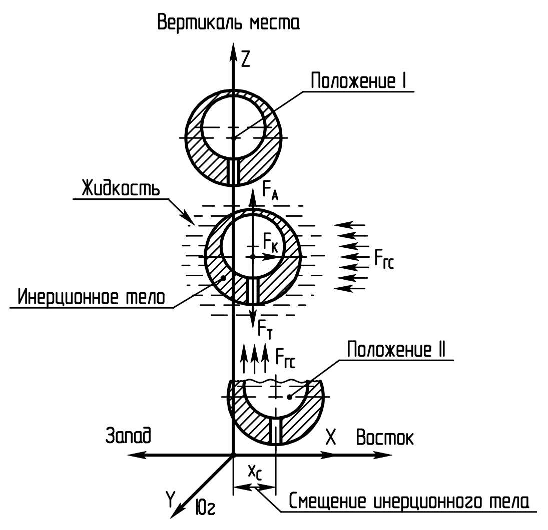


Рис. 4. *Силы, действующие на инерционное тело, полностью погруженное в жидкость*

Уравнения динамики полупогруженного инерционного тела имеют вид:

$$\left.\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= F_{\text{К}} - F_{\text{ГС}}(\upsilon_x) - \sigma l_{\text{ГР}} \sin\theta \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= 0 \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= mg - F_{\text{А}} - F_{\text{ГС}}(\upsilon_z) \end{aligned}\right\}, \qquad (3)$$

где: $F_{\text{А}}$ – Архимедова сила; $F_{\text{ГС}}$ – сила гидродинамического сопротивления; σ – коэффициент поверхностного натяжения; $l_{\text{ГР}}$ – длина границы поверхностного слоя жидкости; θ – угол, характеризующий величину поверхностного натяжения.

Анализ решения системы уравнений (3) выявил недостатки схемы поплавкового чувствительного элемента [8]. Основным из них является отсутствие восстанавливающей силы и, следовательно, совершая возвратно-поступательное движение вдоль вертикали места, тело не будет возвращаться в исходное положение (на первоначальную вертикаль места), а будет смещаться под действием силы Кориолиса и разного рода случайных колебаний жидкости.

Дальнейшим развитием поплавкового чувствительного элемента для устройства ориентирования стал чувствительный элемент, построенный по баллистической схеме, рис. 5. Он отличается тем, что в нем инерционное тело с положительной плавучестью постоянно удерживается в определенном положении силами поверхностного натяжения жидкости, которая перемещается только в трубке малого по отношению к инерционному телу сечения.

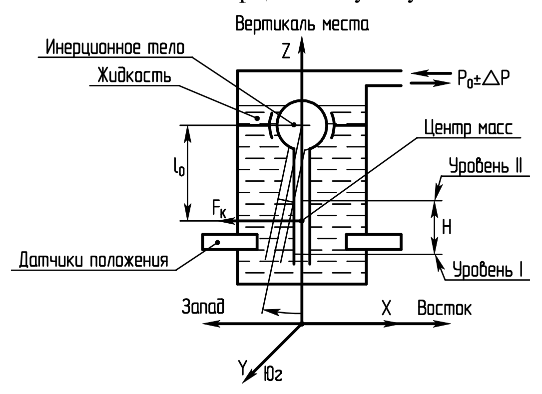


Рис. 5. *Кинематическая схема баллистического чувствительного элемента*

Определение опорного направления происходит в результате быстрого подъёма жидкости по трубке с уровня I до уровня II при повышении давления над жидкостью (P_0+ΔP). При подъёме жидкости на неё будет действовать сила Кориолиса $F_{\text{К}}$, направленная к Западу. Импульсное воздействие силы на подвижную часть проявиться в баллистическом эффекте: подвижная часть инерционного тела практически остается в покое за время действия импульса $F_{\text{К}}$ и начинает свое движение лишь после того, как импульс закончился. Это вызовет поворот тела 1 на угол φ в западном направлении. Величина этого отклонения будет определяться выражением:

$$\varphi = \frac{\pi d^2 (H_2 - H_1)\rho \Omega_3 l_0}{2C_{\text{ж}}} \cdot \sqrt{\frac{P_2 - P_1}{2\rho}} \cdot \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{1-\beta^2}} \times \\ \times \sin(\omega_0 t\sqrt{1-\beta^2}) \cos\lambda, \qquad (4)$$

где: β – коэффициент, определяющий динамические характеристики системы жидкость-инерционное тело; ρ – плотность жидкости; d – диаметр трубки; H_1 и H_2 – начальный и конечный уровень жидкости в трубке при разных давлениях; l_0 – расстояния от центра масс до геометрического центра инерционного тела; $C_{\text{ж}}$ – коэффициент динамичности; ω_0 – частота собственных колебаний системы; P_1 и P_2 – начальное и конечное давление газа над жидкостью.

Моделирование на основе выражения (4) проводилось средствами программы Matcad 8.0 для различных значений переменных. Наиболее характерный режим (для значений β=0,1; ρ=790 кг/м^3; $C_{\text{ж}}$=0,52·10^{-5} кгм/с) представлен на рис. 6. Процесс

затухания колебаний инерционного тела после первоначального баллистического заброса для других значений переменных носит такой же характер, отличаясь временем затухания (не более 30 с).

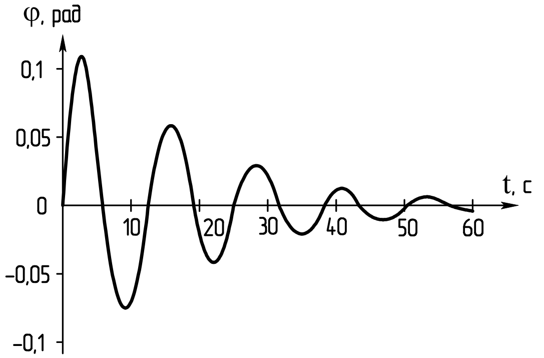


Рис. 6. *Процесс затухания колебаний инерционного тела*

Моделирование показало что, величина «баллистического заброса» достаточно велика и при определенных условиях может достигать 6°, что более чем достаточно для надежной фиксации его системой съема информации.

Проведенные теоретические исследования динамики чувствительных элементов опорного направления Запад-Восток с осциллирующей вдоль вертикали места массой и их физическое и математическое моделирование дали следующие результаты:

1. Создан не имеющий прототипа в области навигации чувствительный элемент определения азимута на основе открытого Г.А. Швецовым биологического механизма волнового гравитационно-инерциального ориентирования.
2. Разработаны и реализованы оптические двухкоординатный (канальный) и непосредственного измерения (матричный) способы съёма информации о векторе движения инерционного тела под действием Кориолисовой силы.
3. Из исследованных типов чувствительных элементов для устройств ориентирования наиболее перспективным с точки зрения минимизации дрейфа (за счет единичного акта измерения) и по быстродействию следует считать чувствительный элемент на основе свободнопадающего инерционного тела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Швецов Г.А., Еськов К.А., Гладышев Г.Н., Дмитриев В.С. Гравитационно-инерциальное ориентирование. Ч. 1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 177 с.
2. Швецов Г.А. Гравитационно-инерциальный механизм определения опорного направления в плоскости горизонта у пчёл и других насекомых // Доклады РАН. – 1993. – Т. 328. – № 6. – С. 750–752.
3. Пат. 2174217 РФ. МПК^7 G01N 17/00. Устройство для ориентирования (его варианты) / Г.Н. Гладышев, Ю.Г. Гладышев, В.С. Дмитриев. Заявлено 27.09. 2000; Опубл. 27.09.2001, Бюл. № 27. – 4 с.: ил.
4. Пат. 2217698 РФ. МПК^7 G01C 17/00. Устройство для ориентирования / Г.Н. Гладышев, В.С. Дмитриев, Ю.Г. Гладышев. Заявлено 01.07.2002; Опубл. 27.11.2003, Бюл. № 33. – 5 с.: 2 ил.
5. Пат. 2183820 РФ. МПК^7 G01N 17/00. Устройство для ориентирования / Г.Н. Гладышев, В.С. Дмитриев, Ю.Г. Гладышев, Г.А. Швецов. Заявлено 20.03.2001; Опубл. 20.06.2002, Бюл. № 17. – 3 с.: ил.
6. Пат. 2234062 РФ. МПК^7 G01C 17/18. Устройство для ориентирования / Г.Н. Гладышев, В.С. Дмитриев, Ю.Г. Гладышев, Г.А. Швецов. Заявлено 17.02.2003; Опубл. 10.08.2004, Бюл. № 22. – 4 с.: ил.
7. Gladyshev G.N., Dmitriev V.S., Gladyshev J.G. Gravitation-inertial compass sensitive element movement dynamics research // Science and Technology: The 3rd Russian-Korean Intern. Symp. – Novosibirsk, 1999. – V. 1. – P. 338–342.
8. Гладышев Ю.Г. Жидкостный чувствительный элемент для определения направления Восток-Запад // Современные техника и технологии: Труды X Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2004. – С. 79–80.